中国天山西部区域云降水物理野外观测科学试验研究若干进展

杨　涛[1,2,3,4]，　杨莲梅[1,3,4]，　李建刚[1,3,4]，　仝泽鹏[1,3,4]

（1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐　830002；2. 新疆气候中心，新疆 乌鲁木齐　830002；3. 新疆云降水物理与云水资源开发实验室，新疆 乌鲁木齐　830002；4. 西天山云降水物理野外科学观测试验基地，新疆 新源　844900）

摘　要： 天山西部区域是中亚地区降水量最多的区域，其向西开口独特河谷地形与西风环流构成了中亚区域独有的云降水物理过程，降水形成积雪、冰川和径流对中亚社会经济和生态环境形成重要影响。随着国家“丝绸之路经济带”建设的推进，对中亚水资源、气象防灾减灾和生态环境保护提出了严峻的科技挑战，而该区域云降水物理过程的观测和研究是科技基础，仍处于起步阶段，不能满足国家战略和中国气象事业发展需求，为此于2019年建设了天山西部区域云降水物理野外观测科学试验基地，并对云宏微物理、层状云/对流云雨滴谱、中/西天山雨滴谱特征异同、冷锋暴雪微物理等开展了相关研究并取得了前沿成果，本文对此进行提炼总结，以期推动中亚地区云降水物理学科发展。

关 键 词： 野外观测试验；云降水；宏微物理特征；研究进展；中国天山西部区域

文章编号： 1000－6060(2023)10－1602－10(1602～1611)

干旱区水资源是制约社会经济发展和生态环境格局的关键因素，而降水是水资源的根本来源[1-3]。天山因其降水丰富和储水能力突出被誉为“中亚水塔”[4-6]，天山降水对中亚特别是新疆的天气气候、生态环境和水安全具有关键而深远的影响。降水由复杂的宏微观物理过程共同影响产生，宏微观物理观测研究是认识云形成降水过程和降水预报的基础。因此，近年来国家开展了若干重大科学实验，包括青藏高原云和降水系统观测试验[7-11]、华南地区台风和强降水观测试验[12-15]及长江中下游云和降水观测试验[16-17]。这些观测试验利用各类高精度观测设备对云和降水宏微物理特征开展了深入研究，推动了中国各区域云降水物理学科的进步和降水形成机制认识。

降水物理过程、成云致雨过程及定量估测降水等具有很强的地区、气候背景和季节依赖性[18-20]。而中亚干旱气候背景和复杂沙漠-绿洲-冰雪山盆地形和下垫面特征，云降水物理过程具有区域特色。中亚降水在空间上分布极其不均，由于天山地形的影响，山区是降水高值区，而该区域云和降水宏微观物理特征观测研究还未开展，是制约中亚干旱区云降水物理理论发展和降水预报提高的关键科学问题。为此，在财政部科研基础条件专项“西天山云降水物理观测试验基地建设I和II期”的支持下，2019年中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所在天山西部区域建设了综合观测试验基地，该云降水物理野外综合观测试验基地是中亚地区设备种类最全、最先进、观测要素最丰富的云降水物理过程观测基地。该基地可为新疆云和降水宏微物理特征研究、云水资源监测和精细化评估、区域数值

收稿日期： 2023-02-13；　**修订日期：** 2023-03-15

基金项目： 天山英才培养计划项目(2022TSYCLJ0003)；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(IDM2022001)；中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所科技发展基金(KJFZ202301)资助

作者简介： 杨涛(1969-)，男，高级工程师，主要从事天气气候研究. E-mail: yd_yang@sina.com

通讯作者： 杨莲梅(1969-)女，研究员，主要从事中亚天气气候和云降水物理研究. E-mail: yanglm@idm.cn

模式参数化方案改进等提供观测基础和科学支撑，从而为新疆社会经济高质量发展、生态环境改善和气象灾害监测预警提供支撑。

1 天山西部区域云降水物理观测试验基地布局

伊犁河谷北、东、南三面环山，向西开口的河谷地形有利于西风环流在山地迎风坡形成地形雨，从而成为我国西北乃至中亚最大降水中心，平原年降水量200~400 mm，山区达600~800 mm甚至更多，是中亚区域最理想的云降水物理观测试验区域。云降水物理野外综合观测试验基地在伊犁河谷建设，观测站布局（图1），主观测站为伊犁河谷西部伊宁县站（81°32′00″E，43°58′24″N；海拔771 m）和伊犁河谷东端新源县站（83°15′25″E，43°26′25″N；海拔928.3 m）。新源县是伊犁河谷降水量最大区域，布设观测仪器最先进、种类最全、观测要素最多，气象行业称之为超级站，包括C波段双偏振雷达、Ka/Ku双频云雷达、边界层风廓线雷达、微雨雷达、激光雨滴谱仪、二维视频雨滴谱仪、激光云高仪、地基微波辐射计和GPS/MET水汽探测仪，均建设在新源县国家基本气象站观测场内，为了避免C波段双偏振雷达仰角观测空白区及附近天山地物回波的阻挡，该雷达建设于新源县观测站以西约30 km的肖尔布拉克镇，由此组成了新源县云降水物理观测超级站。各仪器厂家、型号、设备参数具体见表1，观测时间分辨率可达秒级/分钟级、空间分辨率达米级，物理要素观测精度与国际同步。伊宁县站仅比新源站少布设了云雷达和风廓线雷达，此外巩留县站（82.14°E，43.28°N；海拔774.4 m）、尼勒克站（82.34°E，43.48°N；海拔1107.1 m）、昭苏站（81.08°E，43.09°N；海拔1860.2 m）、特克斯站（81.42°E，43.11°N；海拔1210.5 m）和伊犁植物园站（83.61°E，43.39°N；海拔1340 m）作为补充观测站，均布设有激光雨滴谱仪和GPS/MET水汽探测仪，巩留和昭苏站还布设有微雨雷达。上述观测站网组成的天山西部区域云降水物理野外综合观测试验基地（图1），覆盖了整个伊犁河谷区域。为了对比分析中/西天山雨滴谱的异同，在中天山乌鲁木齐站（87.37°E，43.47°N；海拔918.7 m）和天池站（88.07°E，43.53°N；海拔1935.2 m）布设了激光雨滴谱仪和GPS/MET水汽探测仪。

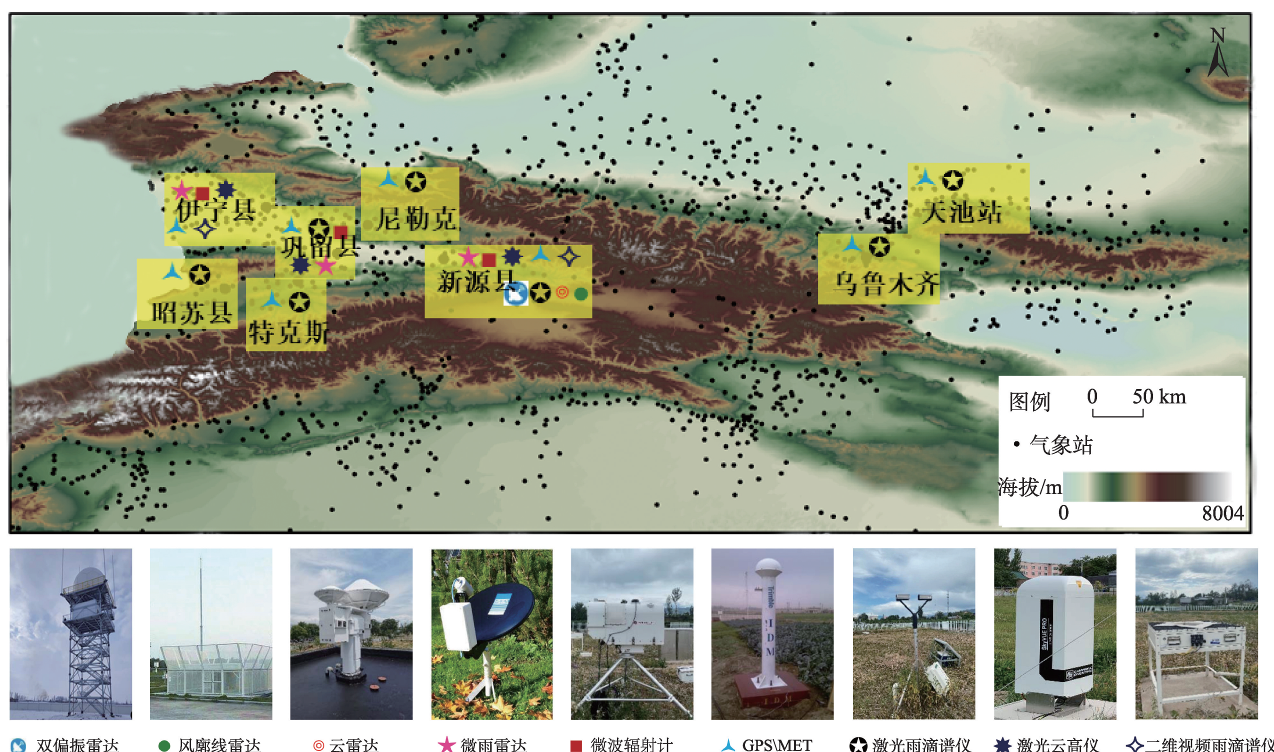


图1 天山西部区域云降水物理野外综合观测试验基地站点布局

Fig. 1 Site layout of cloud and precipitation physics field comprehensive observation test bases in western Tianshan Mountains of China

表1 各站点布设设备及技术参数

Tab. 1 Layout of equipment and technical parameters at each station

站点	设备名称	时空分辨率	其他参数
新源县站	C波段双偏振雷达（CINRAD/CC-D）	时间分辨率（6 min）、测量分辨率（反射率因子0.5 dBZ；速度0.2 m·s⁻¹；谱宽0.2 m·s⁻¹）	探测距离（强度≥400 km；速度≥150 km；谱宽≥150 km；双偏振≥150 km）
	双波段云雷达（WR-KaKu，北京无线电测量研究所/中国）	时间分辨率（1 min）、空间分辨率（回波强度≤0.2 dBZ；方位≤0.5°；俯仰≤0.5°；径向速度≤0.1 m·s⁻¹；速度谱宽≤0.1 m·s⁻¹）	探测高度范围：0.12~20.00 km；
	边界层风廓线雷达（CFL-16A，北京无线电测量研究所/中国）	高度分辨率（低模式≤60 m或50 m；高模式≤120 m或100 m）；时间分辨率[五波束≤6 min（夏季）；三波束≤6 min（冬季）]	测风最小探测高度（60 m）、测风最大探测高度（≥3 km）、水平风速（0~60 m·s⁻¹）、风向（0~360°）
	微雨雷达（MRR-2，METEK/德国）	光谱采样速率（10 s）、垂直分辨率（冬季150 m；夏季200 m）	测量高度范围（30～6000 mm）、高度取样数（30层）、雨滴谱粒径范围（0.109~6 mm）
	二维视频雨滴谱仪（2DVD，JOANNEUM RESEARCH/奥地利）	水平分辨率（≤0.2 mm）、垂直分辨率[≤0.2 mm（<10 m·s⁻¹）]、最小测量时间间隔（≤15 s）	测量粒径范围[≥8 mm（液态）]、可分辨通道数（≥100通道）、降水测量精度（±10%）
	地基微波辐射计（MP-3000，Radiometrics/美国）	时间分辨率（3 min）、垂直分辨率（0～500 m：50 m；500～2 km：100 m；2～10 km：250 m）	通道数（共35通道）、探测高度（10 km）
	激光云高仪（TR-SkyVUE PRO，Campbell/美国）	时间分辨率（1 min）	穿透云层（5层）
	激光雨滴谱仪（Parsivel2，OTT/德国）	时间分辨率（1 min）、空间分辨率（0.2 mm）	粒径（0.2~25 mm）、速度（0.2~20 m·s⁻¹）
	GPS/MET水汽探测仪（Trimble-5/9，Trimble/美国）	时间分辨率（30 min）	整层
伊宁县站	C波段多普勒天气雷达（四创电子股份有限公司/中国）	时间分辨率（6 min）、空间分辨率（150 m）	雷达工作频率（5.3~5.7 G）、方位角（0~360°）、探测范围（400 km；速度、谱宽200 km）、距离分辨率（150 m）、角度分辨率（≤0.01°）
	微雨雷达	同上	同上
	二维视频雨滴谱仪	同上	同上
	地基微波辐射计	同上	同上
	激光云高仪	同上	同上
	激光雨滴谱仪	同上	同上
	GPS/MET水汽探测仪	同上	同上

此外，在新疆建设了67台GPS/MET水汽探测仪（图2），主要布设于天山山区及其两侧、阿尔泰山麓和昆仑山北缘，海拔最高站为天山大西沟（海拔3543.8 m），在塔克拉玛干沙漠腹地塔中站和古尔班通古特沙漠克拉玛依站也布设有GPS/MET水汽探测仪，为新疆大气可降水量探测和降水预报预警提供了观测基础。

2 观测产品信息和数据监测传输系统

观测基地从2019年1月开始建设和观测，至2021年1月完成全部建设，目前全年进行观测，提供的观测产品（表2）包括水汽、温度、气压、风、降水、云等。

为了保障野外观测数据的完整性和有效性，在各观测基地设立专职人员负责各型仪器的运行维护、数据监测和传输，并保障试验基地观测环境干净整洁。科研人员和厂家定期对各仪器进行标定和检修工作，对出现的技术问题及时与厂家沟通加以解决，保障各设备正常运行。在数据监测方面，开发了“西天山云降水观测数据综合监测和传输系统”，实现了云降水物理外场观测试验数据的实时监测、存储及下载功能，避免因设备损坏、停电等引发的数据缺测情况发生。

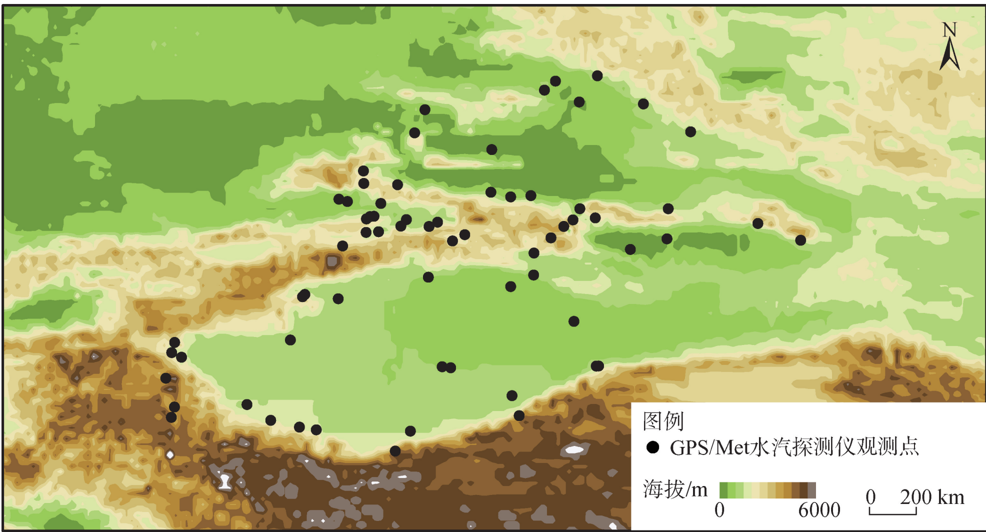


图2　新疆GPS/MET水汽探测仪分布

Fig. 2　Distribution of GPS/MET water vapor detectors in Xinjiang

表2　观测数据产品信息

Tab. 2　Information of observation data products

产品类型	产品描述	设备	时间分辨率/min	站点数量
水汽产品	整层水汽	GPS/MET	30	67
	水汽廓线	微波辐射计	3	2
		微雨雷达	1	4
温度产品	温度廓线	微波辐射计	3	2
气压数据	地面气压	微波辐射计	3	2
风产品	风廓线	边界层风廓线雷达	6	1
降水产品	降水量、降水类型和宏微物理特征	激光雨滴谱仪	1	8
		二维视频雨滴谱仪	1	2
		微雨雷达	1	4
		C波段双偏振雷达	6	1
云观测产品	云高	激光云高仪	1	3
	云宏微物理特征	双频毫米波云雷达	1	1

3　相关研究进展

利用2019—2021年观测试验数据开展了相关研究，主要进展有云宏微观物理、层状云/对流云雨滴谱、中/西天山雨滴谱特征异同、冷锋暴雪微物理方面的成果，研究表明天山云和降水宏微物理特征具有区域特点，与东部季风区和青藏高原有明显差异。

3.1　云宏微物理特征

3.1.1　*云顶、云底和云厚度观测特征*　对2019—2021年新源站Ka波段云雷达和FY4A观测进行验证和校正，建立云雷达和FY4A观测融合的云顶高度、云底高度和云厚度数据集，研究表明[21]，夏季云顶高度、云底高度和云厚度最高（云顶高度：7.43 km，云底高度：3.31 km，云厚度：4.12 km），冬季最低（云顶高度：6.04 km，云底高度：2.71 km，云厚度：3.33 km）。云发生频率昼夜变化显著，春、夏、冬季云在夜间（19:00—10:00 BJT）频繁形成，于白天（11:00—17:00 BJT）逐渐消散。秋季云于上午（10:00—14:00 BJT）形成频率高，在其他时段消散。云季节性变化与夏季高温和冬季低温有关，而云昼夜变化则与喇叭口地形造成的山谷风环流昼夜变化有关。春、秋两季的云顶高度有2个最可能高度，分别为4~5 km和8~9 km；夏季最可能高度分别为5~6 km和9~10 km；冬季只

有一个最可能高度，为7~8 km。非降水情况下，云顶高度垂直分布与云层相似，而降水情况下，云顶高度常表现为：春季8 ~ 9 km、夏季9~10 km、秋季5~6 km和冬季7~8 km，云底高度的最可能高度多为0~2 km。四季云厚度小于2 km的薄云约占云量55%，降水云最可能云厚度在春、夏、冬三季峰值为7~8 km，秋季峰值达5~6 km。有云样本约占15%，而有云样本中四季低云占40%~50%，中云占35%~50%，而高云占10%~20%。夏季高云比例最高，中云比例则低于其他3个季节。夏季低云、中云和高云的平均云顶高度都高于其他3个季节，冬季低、中、高云的平均云底高度和云顶高度最低。可见，该区域低云和中云比例高，空中水资源开发潜力大，冬季云最低更适合人工增雪作业。

3.1.2 降雨云微物理观测特征 按降雨量(R)，0.1 mm·h^{-1}≤R<1 mm·h^{-1}、1 mm·h^{-1}≤R < 3 mm·h^{-1}、R≥3 mm·h^{-1}划分小雨强、中雨强和大雨强，研究表明[22]小、中和大雨强云中粒子聚合碰并增长效果较强的高度分别为1.8~2.8 km、1.6~2.5 km和2.5~3.5 km，可见强降雨云伸展更高；小、中和大雨强降雨云反射率因子(Z)平均最大值分别为30 dBZ、35.8 dBZ和39.5 dBZ，最大平均液态含水量分别为1.5 g·m^{-3}、4.2 g·m^{-3}和7.3 g·m^{-3}，液态水是雨强大小的关键因素，该区域小雨强降水最大平均液态含水量大于祁连山区域[23]。雨强越大反射率因子集中度越高，不同雨强反射率因子有2个集中区域，2.0~4.4 km反射率因子集中于15~26 dBZ，小、中和大雨强近地面反射率因子分别集中于24~32 dBZ、29~38 dBZ和31~42 dBZ。2.00 km以下小雨强垂直运动为−5.5~−4.0 m·s^{-1}，中和大雨强垂直运动为−7~−5 m·s^{-1}，雨强越大垂直运动越强。

3.1.3 降雪云微物理观测特征 根据新疆24 h降雪量(S)，当0.1 mm≤S≤3.0 mm时为小雪，3.1 mm≤S≤6.0 mm时为中雪，6.1 mm≤S≤12.0 mm时为大雪。基于12次小雪、7次中雪和4次大雪过程云雷达观测研究表明[24]，小、中和大雪降雪云集中分布于0.15~2.50 km，反射率因子集中于8~24 dBZ，小雪云最大反射率因子为29 dBZ，中和大雪云最大反射率因子均为33 dBZ。小、中和大雪云反射率因子归一化等高频率大致相似，但大雪过程2 km以下反射率因子远大于小雪和中雪，这是由于其小时雪强大。小、中和大雪云雪粒子含水量分别位于2.00~7.65 km(大多小于0.008 g·m^{-3})、2.20~8.85 km(多小于0.01 g·m^{-3})和3.0~8.7 km(小于0.013 g·m^{-3})，大雪2 km以下云雪粒子含水量为0.1~0.25 g·m^{-3}，明显大于小和中雪过程。小雪过程云含水量最少，降雪过程平均持续时间最短，而大雪云含水量最为充足，为大雪降雪过程提供足够的水汽，降雪过程平均持续时间最长，大雪过程旺盛期云雪粒子含水量为0.04~0.2 g·m^{-3}，与中国北京地区相当[25]，说明干旱区大雪过程水汽比较充沛。小、中和大雪云下沉运动多发生于6 km以下，垂直运动集中于在−1.4~−0.6 m·s^{-1}，各量级降雪过程垂直运动差异较小。

3.2 降水雨滴谱观测特征

3.2.1 不同季节降雨雨滴谱观测特征 雨滴谱观测数据研究表明[26]：(1) 降雨的微物理参量平均值普遍比中国东部地区偏小[27]，以小粒子为主，具有其本地特征，层状云降雨的雨滴谱参量变化小，对流云降雨则变化大。降雨天气过程，夏季(秋季)中雨滴(1 mm<雨滴直径<3 mm)和大雨滴(直径≥3 mm)最多(最少)、小雨滴(直径≤1 mm)最少(最多)，且夏季有最大直径雨滴。夏季(秋季)，小雨滴对降水量的贡献最小(最大)，中雨滴和大雨滴对降水量的贡献最大(最少)，小雨滴对总雨滴数浓度的贡献最小(最多)，中雨滴和大雨滴对总雨滴数浓度贡献最大(最少)。夏季(秋季)质量加权平均直径的最大平均值为1.059 mm(最小值为0.876 mm)，中值体积直径的分布特征与质量加权平均直径相似。标准化截距参数的平均值在秋季达到最大值3.738，夏季达到最低值3.505。(2) 春季对流云和层状云降雨的中值体积直径(标准化截距参数)的平均值分别为2.329 mm(2.997)和0.897 mm(3.693)，夏季对流云和层状云降雨的中值体积直径(标准化截距参数)的平均值比春季的大(小)，秋季层状云降雨的中值体积直径(标准化截距参数)的平均值略小于(大于)春季。各季层状云降雨都是主导降雨云系，与对流云降雨相比含有更多的小雨滴，以及更少的中和大雨滴。对于层状云降雨，夏季(秋季)的小雨滴最少(最多)，中雨滴和大雨滴最多(最少)，夏季平均雨滴直径最大。对于对流云降水，夏季中、小雨滴比春季少，大雨滴较多。(3) 将降水量(R)分为5个等级(C1，0.1 mm·h^{-1}≤R<0.5 mm·h^{-1}；C2，0.5 mm·h^{-1}≤R<1 mm·h^{-1}；C3，1 mm·h^{-1}≤R<2 mm·h^{-1}；C4，2 mm·h^{-1}≤R<5 mm·h^{-1}；C5，R≥5 mm·h^{-1})。秋季降水小雨滴浓

度在前4个等级中最高，夏季小雨滴浓度在所有等级中最低。随着降雨率等级增加，春季中、大雨滴浓度从C1的最低值（与秋季相当）变为C4（与夏季相当），在C5超过夏季达到最大值，从C1到C5，春季不同直径的雨滴浓度呈上升趋势。各季节，质量加权平均直径、中值体积直径和反射率因子均随降雨率等级的增加而增加，除C5外，这些参数在夏季（秋季）达到最大值（最小值）。然而，在所有降雨率等级中，标准化截距参数在秋季（夏季）达到最大（最小）。（4）雨滴形状-雨滴大小关系具有明显的季节变化特征，与其他地区结果也存在显著差异。在所有季节中，夏季水汽的垂直积分最大，温暖干燥的大气垂直环境最为突出，冷雨过程和强对流降雨更为频繁，这些是影响夏季小雨滴最少、中雨滴和大雨滴多的因素。

3.2.2 层状云和对流云降水雨滴谱观测特征　雨滴谱观测数据研究表明[28-29]：（1）西天山降水以弱降雨为主，雨强<1 mm·h^{-1}约占70%，质量加权平均直径和变量（降水量，平均液态含水量和反射率因子）呈正偏态，表明伊宁地区降雨变率大。（2）对流云降雨质量加权平均直径和降水量分别集中于1.0~2.0 mm和5.0~6.0 mm·h^{-1}，层状云降雨质量加权平均直径和降水量分别集中于0.6~1.6 mm和1.0~2.0 mm·h^{-1}，随着降水量增加质量加权平均直径增大且分布更窄。对流云和层状云降雨的雨滴谱峰值分别位于直径1.2 mm和0.7 mm处，当直径小于0.7 mm时，两类降雨的雨滴谱基本重合，而当直径大于0.7 mm时，对流云降雨雨滴谱远大于层状云降雨雨滴谱（图3）。（3）根据不同降雨强度，发现随着降水量增大质量加权平均直径增大，雨滴谱谱宽增加，峰值直径增加，而雨滴数浓度呈现先增大后减小的趋势。在质量加权平均直径较小（小于0.6 mm）时，不同降雨率等级对应雨滴粒子浓度相近，当直径大于0.6 mm时，高降雨率等级对应雨滴粒子浓度明显增大。（4）推导伊宁地区的*Z-R*（反射率因子-降水量）关系，对流云降水$Z=204.57R^{1.80}$，层状云降水$Z=190.36R^{1.73}$，发现WSR-88D默认*Z-R*关系低估层状云降水反射率值较低的部分，而高估反射率值较高的部分，对于对流云降雨WSR-88D的默认关系总体高估降雨率。*Z-R*关系系数*A*和指数*b*值均小于中国东部地区[27]。

3.2.3 西天山和中天山降水雨滴谱观测特征　天山西部区域尼勒克站和昭苏站，以及中天山乌鲁木齐站和天池站雨滴谱观测研究表明[30-31]：（1）西天山降雨过程中雨滴和大雨滴浓度较高，小雨滴浓度较低，可能由于西天山降水对流强度比中天山强。将降雨强度从小到大分为6级以及层状云和对流云降水，对于所有降雨率等级和降雨类型，西天山较中天山降雨有更大质量加权平均直径和更小的标准化截距参数（图4）。（2）西、中天山对流云降水雨滴谱可归类为大陆性对流云降雨，最大雨滴直径可达5.0~7.0 mm，但数浓度很小。西天山层状云降水的*Z-R*关系具有较高的系数*A*和指数*b*值，中天山层状云降水，Marshall和Palmer提出*Z-R*关系[3]层状云会高估低雷达反射率值时的降水量，而低估高雷达反射率时的降水。对流云*Z-R*关系相关较差，达不到

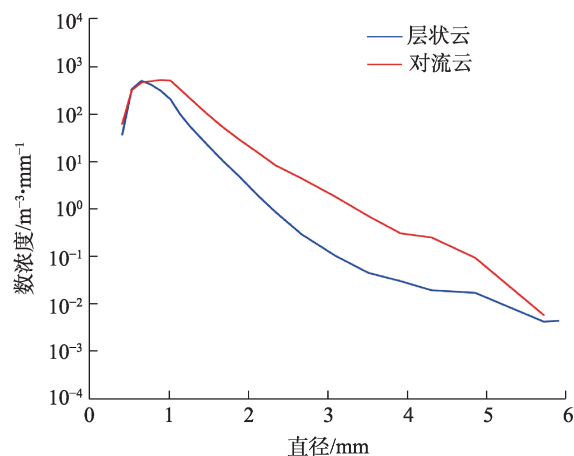


图3　对流云降雨和层状云降雨平均雨滴谱[28]

Fig. 3　Average raindrop size distribution of convective cloud rainfall and stratiform cloud rainfall[28]

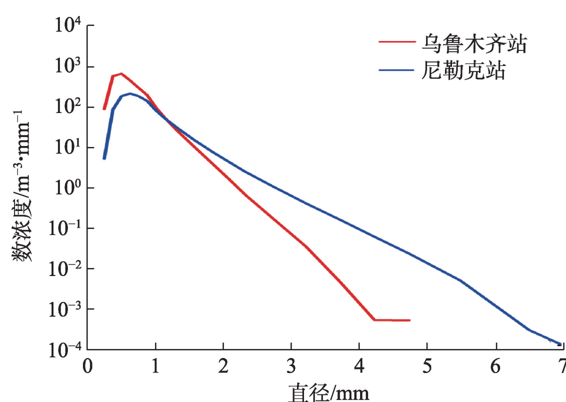


图4　天山西部区域和中天山夏季平均降水雨滴谱[31]

Fig. 4　Summer average precipitation raindrop size distribution of western Tianshan Mountains and central Tianshan Mountains[31]

信度检验，必须应用双偏振雷达开展相关研究提高该区域强降水定量降水估测关系研究。与北京市、湖北省和南京市[32-33]相比较而言，天山地区对流性降水粒子平均直径偏大但浓度远偏低。

3.3 冷锋暴雪过程微物理观测特征

对于2020年2月18—19日冷锋暴雪过程微物理特征的研究，由于冷云降水过程中粒子形态复杂，且固态粒子下落过程中更容易受破碎、聚并和淞附等微物理过程影响，造成降雪过程有雪花和霰粒子[34]。通过观测资料质量控制，设计雪花和霰粒子分类参数，研究表明：(1) 直径<1 mm粒子是雪花主要贡献者，同时也存在少量>6 mm雪花聚集体；直径0.5 mm左右粒子是霰粒子主要贡献者，同时存在少量直径>1 mm的粒子。(2) 冷锋入侵阶段：云顶温度低导致大气冰核多且含有充足水汽及适量过冷水，降雪粒子主要为雪花，微物理过程主要为凝华增长的贝吉龙过程、“黏连”机制的聚并增长和少量淞附过程；冷锋控制阶段：云顶温度升高，大气冰核减少且过冷水丰富，降雪粒子主要为雪花和霰粒子且两者相当，微物理过程主要是聚并增长及淞附过程，同时粒子聚并增长导致的竞争优势利于淞附过程产生；在冷锋过境阶段，由于云顶温度持续升高、大气冰核越加减少加之适当的过冷水，导致参与竞争粒子少，利于淞附过程发生[34]。不同于水汽充沛的季风区的南京地区暴雪过程[35]，西天山地区暴雪过程雪花直径及雪强偏小，霰粒子对雪强贡献较大。

4 讨 论

天山云降水物理野外试验科学观测基地建设时间较短，观测资料积累仅3 a，研究样本不够大，主要应用云雷达和地面雨滴谱仪观测资料进行了云和降水宏微物理特征进行了初步研究，未对所有观测资料进行融合后进行综合研究，尤其是未应用C波段双偏振天气雷达对强对流降水微物理三维结构的研究，微物理参数反演方法还有待进一步提高。今后可以加强一下方面的研究，包括：

(1) 在反演算法方面，采用双矩归一化重建雨滴谱分布，突破伽马雨滴谱分布模型限制，提高C波段双偏振雷达数据反演雨滴谱的准确性；利用垂直指向双频云雷达2个频率通道的返回信号，研究后向自适应迭代法，更准确地反演云降水微物理参数廓线。

(2) 基于观测开展不同季节、不同海拔、不同天气背景下，研究各类降水云系(层状云、混合云、对流云)宏观和微观物理特征，综合应用各类观测资料研究云形成降水物理过程。

(3) 开展不同形态对流风暴微物理三维结构、演变及其与降水的关系研究，发展基于双偏振雷达的适用于天山的定量降水估测算法，提出基于观测的干旱区云微物理参数化优化方案。

(4) 基于本基地观测评估国内外卫星观测云水物理参数在中亚地区的适用性并相互校正，发挥各自优势，开展基于空-天-地综合观测的云水资源精细化评估和监测技术研究，为人工增雨(雪)作业提供科学依据。

5 结 论

降水物理过程以及云水资源等具有很强的气候背景、地形和区域依赖性。中亚独特的干旱气候背景和复杂沙漠-绿洲-冰雪山盆地形，使得中亚区域降水物理过程以及云水资源具有区域特点。主要结论如下：

(1) 有云样本约占15%，而有云样本中四季低云占40%~50%，中云占35%~50%，而高云占10%~20%。夏季云顶高度、云底高度和云厚度最高、冬季最低，春、夏、冬季云在夜间频繁形成，于白天逐渐消散，秋季云于上午形成频率高，在其他时段消散。春、夏、秋季云顶高度有2个最可能高度，冬季只有一个最可能高度。随雨强增大云伸展更高、云反射率因子和平均液态含水量越高，液态水含量是雨强大小的关键因素。降雪云主要在2.50 km以下，反射率因子多小于24 dBZ，最大反射率因子为29~33 dBZ，大雪过程2 km以下反射率因子和云雪粒子含水量明显大于小和中雪过程。

(2) 春、夏、秋季层状云降雨都是主导降雨云系，层状云降雨的微物理参量平均值普遍比中国东部地区偏小，以小粒子为主，夏季微物理参量平均值最大，其次是秋季。雨滴质量加权平均直径、中值体积直径和反射率因子均随降雨率等级的增加而增加，在夏季(秋季)达到最大值(最小值)。小雨滴对雨强的贡献小、对总雨滴数浓度的贡献大，中雨滴和大雨滴对雨强的贡献大。层状云降雨与对

流云降雨相比有更多的小雨滴，以及更少的中和大雨滴。

（3）西天山比中天山降雨过程的中雨滴和大雨滴浓度高、小雨滴浓度低，对于所有降雨率等级和降雨类型，西天山较中天山降雨有更大质量加权平均直径和更小的标准化截距参数，层状云反射率因子-降水量关系相关较好，而对流云关系相关较差，必须考虑包含中、大雨滴的形状的双偏振量提高该区域强降水定量降水估测关系。与北京市、湖北省和南京市比较而言，天山地区对流性降水粒子平均直径偏大但浓度远偏低。与东部季风区暴雪过程相比西天山地区暴雪过程的雪花直径及雪强偏小，霰粒子对雪强贡献较大。

参考文献（References）

[1] 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究[J]. 气象学报, 2007, 65(4): 633-643. [Zhang Qiang, Zhang Jie, Sun Guowu, et al. Research on atmospheric water-vapor distribution over Qilianshan Mountains[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(4): 633-643.]

[2] 张强, 俞亚勋, 张杰. 祁连山与河西内陆河流域绿洲的大气水循环特征研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 907-913. [Zhang Qiang, Yu Yaxun, Zhang Jie. Characteristics of water cycle in the Qilianshan Mountains and oases in Hexi inland river basins[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(6): 907-913.]

[3] 姚旭阳, 张明军, 张宇, 等. 中国西北地区气候转型的新认识[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 671-683. [Yao Xuyang, Zhang Mingjun, Zhang Yu, et al. New insights into climate transition in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 671-683.]

[4] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia)[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(10): 725-731.

[5] Chen Y N, Li W H, Deng H J, et al. Changes in Central Asia's water tower: Past, present and future[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 35458, doi: 10.1038/srep35458.

[6] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountians, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 18-26.]

[7] 刘黎平, 郑佳锋, 阮征, 等. 2014年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果[J]. 气象学报, 2015, 73(4): 635-647. [Liu Liping, Zheng Jiafeng, Ruan Zheng, et al. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the various radars[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(4): 635-647.]

[8] Chen B J, Hu Z Q, Liu L P, et al. Raindrop size distribution measurements at 4500 m on the Tibetan Plateau during TIPEX-III[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122: 11092-11106.

[9] Wu Y H, Liu L P. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Tibetan Plateau and southern China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34: 727-736.

[10] 赵平, 李跃清, 郭学良, 等. 青藏高原地气耦合系统及其天气气候效应: 第三次青藏高原大气科学试验[J]. 气象学报, 2018, 76(6): 833-860. [Zhao Ping, Li Yueqing, Guo Xueliang, et al. The Tibetan Plateau surface-atmosphere coupling system and its weather and climate effects: The third Tibetan Plateau atmospheric scientific experiment[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(6): 833-860.]

[11] Wang G L, Zhou R R, Zhaxi S, et al. Raindrop size distribution measurements on the southeast Tibetan Plateau during the STEP project[J]. Atmosphere Research, 2021, 249: 105311, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105311.

[12] Wu Z H, Zhang Y, Zhang L F, et al. Characteristics of summer season raindrop size distribution in three typical regions of western Pacific[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124: 4054-4073.

[13] Zeng Q W, Zhang Y, Lei H C, et al. Microphysical characteristics of precipitation during pre-monsoon, monsoon, and post-monsoon periods over the South China Sea[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(10): 1103-1120.

[14] Zhang A, Hu J, Chen S. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the monsoon season observed in southern China[J]. Remote Sensing, 2019, 11: 432, doi: 10.3390/rs11040432.

[15] Huang C Y, Chen S, Zhang A. et al. Statistical characteristics of raindrop size distribution in monsoon season over South China Sea[J]. Remote Sensing, 2021, 13(15): 2878, doi: 10.3390/rs13152878.

[16] Wen L, Zhao K, Chen G. Drop size distribution characteristics of seven typhoons in China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123: 6529-6548.

[17] Fu Z K, Dong X Q, Zhou L L. et al. Statistical characteristics of raindrop size distributions and parameters in Central China during the Meiyu seasons[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125, e2019JD031954, doi: 10.1029/2019JD031954.

[18] Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. Reviews of Geophysics, 1973, 11(1): 1-35.

[19] Brandes E A, Zhang G, Vivekanandan J. An evaluation of a drop distribution-based polarimetric radar rainfall estimator[J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42(5): 652-660.

[20] Chen B J, Yang J, Pu J P. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in eastern China[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2013, 91(2): 215-227.

[21] Chen P, Yang L M, Zeng Y, et al. Fine vertical structures of cloud from a ground-based cloud radar over the western Tianshan Mountains[J]. Meteorological Applications, 2022, 29: e2015, doi: 10.1002/met.2105.

[22] 张晋茹, 杨莲梅, 刘凡, 等. 基于Ka波段云雷达观测的中国西天山降雨云宏微观物理特征研究[J]. 大气科学, 2023, 47(3): 756-768. [Zhang Jinru, Yang Lianmei, Liu Fan, et al. Macro-micro physical characteristics of rainfall clouds in the west Tianshan Mountains based on Ka band cloud radar[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 47(3): 756-768.]

[23] 黄颖, 付丹红, 郭学良, 等. 青藏高原东北部祁连山一次降水性层状云微物理特征的飞机观测研究[J]. 大气科学, 2022, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2207.22019. [Huang Ying, Fu Danhong, Guo Xueliang, et al. Aircraft measurement on the microphysical properties of a precipitating stratiform cloud event in the Qilian Mountains of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2207.22019.]

[24] Zhang J R, Li H R, Zeng Y, et al. Macro-and microphysical characteristics of snowfall and non-snowfall clouds in the west Tianshan Mountains of China based on cloud radar[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2022, 134: 98, doi: 10.1007/s00703-022-00914-5.

[25] 陈羿辰, 金永利, 丁德平, 等. 毫米波测云雷达在降雪观测中的应用初步分析[J]. 大气科学2018, 42(1): 134-149. [Chen Yichen, Jin Yongli, Ding Deping, et al. Preliminary analysis on the application of millimeter wave cloud radar in snow observation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(1): 134-149.]

[26] Zeng Y, Yang L M, Tong Z P, et al. Statistical characteristics of raindrop size distribution during rainy seasons in northwest China [J]. Advance in Meteorology, 2021: 6667786, doi: 10.1155/2021/6667786.

[27] 黄兴友, 印佳楠, 马雷, 等. 南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及其在天气雷达探测中的应用[J]. 大气科学, 2019, 43(3): 691-704. [Huang Xingyou, Yin Jianan, Ma Lei, et al. Comprehensive statistical analysis of rain dropsize distribution parameter and its application for weather radar measurement in Nanjing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(3): 691-704.]

[28] Zeng Y, Tong Z P, Jiang Y F, et al. Microphysical characteristics of seasonal rainfall observed by a Parsivel disdrometer in the Tianshan Mountains, China[J]. Atmospheric Research, 2022, 280: 106459, doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106459.

[29] Zeng Y, Yang L M, Tong Z P, et al. Characteristics and applications of summer season raindrop size distributions based on a Parsivel2 disdrometer in the western Tianshan Mountains (China)[J]. Remote Sensing, 2022, 14(16): 3988, doi: 10.3390/rs14163988.

[30] Jiang Y F, Yang L M, Zeng Y, et al. Comparison of summer raindrop size distribution characteristics in the western and central Tianshan Mountains of China[J]. Meteorology Application, 2022, 29: e2067, doi: 10.1002/met.2067.

[31] Zeng Y, Yang L M, Zhou Y S, et al. Statical characteristics of summer season raindrop size distribution in the western and central Tianshan Mountions in China[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2022, 100(6): 855-872.

[32] Wen L, Zhao K, Zhang G, et al. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in east China during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and micro rain radar data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121: 2265-2282.

[33] Wen G, Xiao H, Yang H L, et al. Characteristics of summer and winter precipitation over northern China[J]. Atmospheric Research, 2017, 197: 390-406.

[34] 刘凡, 张晋茹, 刘晶, 等. 西天山地区一次冷锋暴雪微物理特征分析[J]. 大气科学, 2023, 47(2): 417-429. [Liu Fan, Zhang Jinru, Liu Jing, et al. Microphysical characteristics of a cold front snowstorm in the west Tianshan[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 47(2): 417-429.]

[35] 李遥, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 2018年冬季南京三次暴雪过程微物理特征分析[J]. 大气科学2019, 43(5): 1095-1108. [Li Yao, Niu Shengjie, Lü Jingjing, et al. Analysis on microphysical characteristics of three blizzard processes in Nanjing in the winter of 2018[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(5): 1095-1108.]

Progress of the scientific experimental for cloud and precipitation physical observation in the western Tianshan Mountains of China

YANG Tao[1,2,3,4], YANG Lianmei[1,3,4], LI Jiangang[1,3,4], TONG Zepeng[1,3,4]

(1. Institute of Desert and Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Climate Center, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Cloud Precipitation Physics and Cloud Water Resources Development Laboratory, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
4. Field Scientific Observation Base of Cloud Precipitation Physics in West Tianshan Mountains, Xinyuan 844900, Xinjiang, China)

Abstract: The western Tianshan Mountains in China experiences the highest precipitation in Central Asia. The unique valley topography of the mountains at its westward opening and westerly circulation lead to an exclusive cloud-precipitation physical process in Central Asia. The formation of snow and glaciers and runoff by precipitation considerably affects the social economy and ecological environment of Central Asia. The proposal and implementation of the national "Silk Road Economic Belt" construction have posed serious scientific and technological challenges to water resources, meteorological disaster prevention and mitigation, and ecological environment protection in Central Asia. The observation and research on cloud-precipitation physical processes in this region is the basis of science and technology; however, it is still in its nascent stage and cannot meet the requirements of the national plan and China's meteorological development. Hence, herein, a scientific experimental base was built for the field observation of cloud and precipitation physics in the western Tianshan Mountains of China in 2019, and relevant research was conducted on the macro and microphysical characteristics of clouds, raindrop spectrum characteristics of stratiform and convective clouds, similarities and differences in the raindrop spectrum characteristics between the central and western Tianshan Mountains, and microphysical characteristics of cold front snowstorm. This paper summarizes the frontier achievements to promote the development of cloud and precipitation physics in Central Asia.

Key words: field observation test; cloud precipitation; macro micro physical characteristics; research progress; western Tianshan Mountains of China